

## Risultati del progetto di ricerca PRIN "laghi 2003-2005"

Walter Dragoni<sup>1</sup>, Vincenzo Piscopo<sup>2</sup>, Lucio Di Matteo<sup>1</sup>, Lucia Gnucci<sup>1</sup>, Antonio Leone<sup>3</sup>,  
Francesca Lotti<sup>2</sup>, Massimo Melillo<sup>1</sup>, Marco Petitta<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Università di Perugia, Dipartimento di Scienze della Terra, dragoni@unipg.it

<sup>2</sup>Università della Tuscia, Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile

<sup>3</sup>Università della Tuscia, Dipartimento di Tecnologie, Ingegneria e Scienze dell'Ambiente e delle Foreste

<sup>4</sup>Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Scienze della Terra

### *Results of the PRIN research project "lakes 2003-2005"*

**ABSTRACT:** The results are presented of the PRIN 2003-2005 Research Project: "Impact of anthropic activities and of climatic variations on the water budget of the most important lakes in central Italy: modeling of the active processes and possible management strategies." This project, starting with the analysis of the hydrogeological and environmental problems in the main lake systems in central Italy, has given new geological and hydrogeological knowledge useful for updating water budgets and modeling various processes. In addition, a mathematical model for simulating lake levels was prepared which will be useful for estimating unknown terms of the budget and defining possible scenarios in various climatic situations and different management hypotheses. The results obtained could contribute to the preparation of a land plan that preserves the environment and optimizes the use of resources.

**Key terms:** Hydrogeology, Bolsena Lake, Vico Lake, Bracciano Lake, Trasimeno Lake, Climate change, Modeling

**Termini chiave:** Idrogeologia, Lago di Bolsena, Lago di Vico, Lago di Bracciano, Lago Trasimeno, Variazioni climatiche, Modellistica.

### **Riassunto**

Vengono presentati i risultati del Progetto di Ricerca PRIN 2003-2005 "Impatto dell'attività antropica e delle variazioni climatiche sul bilancio idrogeologico dei più importanti laghi dell'Italia Centrale: modellizzazione dei processi in corso e possibili strategie di gestione". Il progetto, a partire dall'analisi dei problemi idrogeologici ed ambientali dei principali sistemi lacustri dell'Italia centrale, ha ampliato le conoscenze geologiche ed idrogeologiche necessarie per l'aggiornamento dei bilanci idrogeologici e per la modellizzazione di vari processi. È stata, inoltre, messa a punto una versione aggiornata di un modello matematico di simulazione dei livelli lacustri, utile per stimare grandezze incognite del bilancio e per definire possibili scenari sotto varie situazioni climatiche e diverse ipotesi di gestione. Si ritiene che i risultati ottenuti possano contribuire alla messa a punto di una pianificazione territoriale che conservi l'ambiente e ottimizzi l'utilizzo delle risorse.

### **1. Introduzione**

Questa nota sintetizza i risultati di una ricerca biennale sui sistemi lacustri del versante tirrenico dell'Italia Centrale (fig. 1). La ricerca è nata con l'obiettivo di definire i problemi ambientali ed idrogeologici dei sistemi studiati e di fornire informazioni e strumenti concettuali per una

gestione razionale dei sistemi stessi, possibilmente esportabile anche per altri casi simili.

Molti dei laghi minori della zona considerata sono in una condizione ambientale poco compromessa o recuperabile con una certa facilità, soprattutto perché turisticamente poco noti, con un piccolo bacino idrografico ed ubicati in zone a bassa densità di popolazione (quali, solo per esempio, i laghetti di Giulianello, Martignano, Mezzano). I laghi più grandi (Nemi, Albano, Bracciano, Vico, Bolsena e Trasimeno), oltre a costituire una risorsa fondamentale per acqua potabile ed irrigazione, rivestono una notevole importanza naturalistica, turistica e per l'agricoltura: gli interessi presenti, spesso contrastanti, rendono la gestione di questi sistemi molto complessa, sia dal punto di vista tecnico-scientifico che politico. I problemi gestionali sono aggravati dal fatto che attualmente il Mediterraneo occidentale sta attraversando una fase climatica caratterizzata da un trend climatico siccitoso, riconducibile nell'ambito delle variazioni climatiche globali (per esempio, Dragoni, 1998; Van Dam, 1999; Cambi *et alii*, 2000; Brunetti *et alii*, 2000).

La ricerca, condotta congiuntamente dalle Università di Perugia e della Tuscia, ha riguardato in modo particolare i laghi Trasimeno, Bolsena, Vico e Bracciano. Essa si è focalizzata essenzialmente sugli aspetti idrologici, idrogeologici e di *land planning* in senso lato.

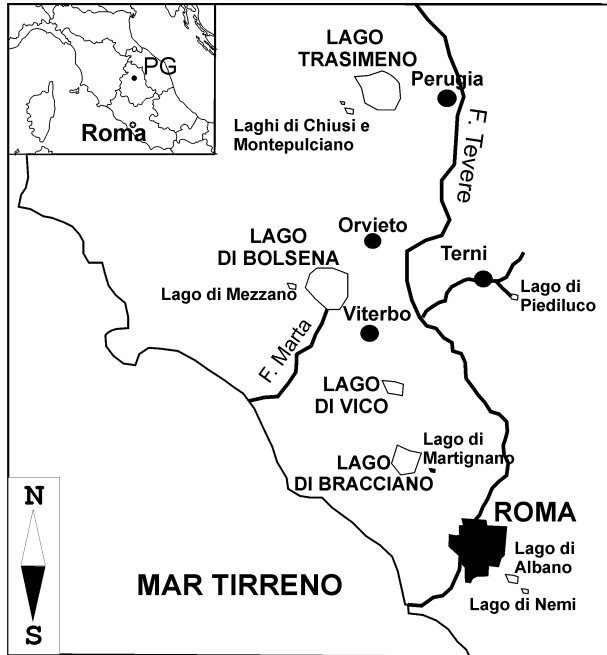


Fig. 1 – Ubicazione dei principali laghi dell’Italia Centrale  
Location of the main Lakes in Central Italy

**2. Approccio usato**

Lo studio, svolto da punti di vista diversi ma fra loro integrati, è stato portato avanti tramite ricerca bibliografica, raccolta e validazioni di dati idrometeorologici, indagini sul campo ed in laboratorio. Oltre agli approcci tradizionali, dove i dati lo hanno permesso, per la simulazione dei processi di trasformazione afflusso-deflusso, trasporto di nutrienti e flusso sotterraneo, è stata eseguita la modellizzazione matematica dei processi stessi, applicando modelli di vario tipo. Nel seguito vengono descritti brevemente i modelli impiegati, dando più spazio al modello LAGO, che è stato implementato nell’ambito della ricerca stessa.

Il modello LAGO nella sua attuale struttura è una variante di una serie di modelli già utilizzati per simulare la trasformazione afflusso-deflusso di alcuni bacini dell’Italia centrale (Cambi *et alii*, 2003). L’insieme dei processi che costituiscono la trasformazione afflusso-deflusso è rappresentato concettualmente con flussi attraverso diversi serbatoi, così da definire i volumi d’acqua in ingresso ed in uscita, rispettando la conservazione della massa. Con riferimento alla figura 2, i primi due serbatoi in parallelo rappresentano il bacino imbrifero del lago, distinguendo le “aree naturali” (*tank 1*) da quelle ad uso irriguo (*tank 2*). Nei serbatoi si realizzano due bilanci idrologici separati: le aree irrigue ricevono come quantità in ingresso sia le precipitazioni che l’acqua distribuita sotto forma di irrigazione ( $Pb_i$ ), mese per mese; quelle non irrigue ricevono le sole precipitazioni ( $Pb_{ni}$ ). Entrambi i serbatoi rappresentano suolo e vegetazione generando, in maniera

indipendente, l’evapotraspirazione ( $ETR_{ni}$  e  $ETR_i$ ) attraverso criteri simili, ma più evoluti, a quelli di Thornthwaite-Mather (Alley, 1984). In entrambi i serbatoi la pioggia produce, in funzione di volume di precipitazione e umidità del suolo, un deflusso veloce ( $QUICK_{ni}$  e  $QUICK_i$ ) (assimilabile in linea di massima al deflusso superficiale) tramite un’equazione, a coefficienti calibrati, proposta da Vandewiele *et alii* (1992). L’acqua residua, assimilabile al deflusso sotterraneo ( $INF_{ni}$  e  $INF_i$ ), alimenta il lago tramite il terzo serbatoio (*tank 3*), posizionato in serie a valle dei primi due. Il flusso dal terzo serbatoio al lago è descritto, in maniera implicita, dall’equazione di Darcy attraverso un coefficiente adimensionale  $\beta$ . Al lago vero e proprio è poi applicata l’equazione del bilancio mese per mese, considerando i volumi provenienti dai serbatoi e quelli che direttamente entrano ed escono dallo specchio del lago: pioggia sullo specchio ( $Ps$ ), acqua immessa artificialmente ( $Vi$ ), evaporazione dallo specchio ( $Ev$ ), acqua in uscita dall’emissario ( $Ve$ ) e prelievi artificiali ( $Pa$ ). Il modello può, quindi, calcolare la variazione di volume del lago e da questo i livelli mensili ( $H$ ) attraverso la curva ipsografica.

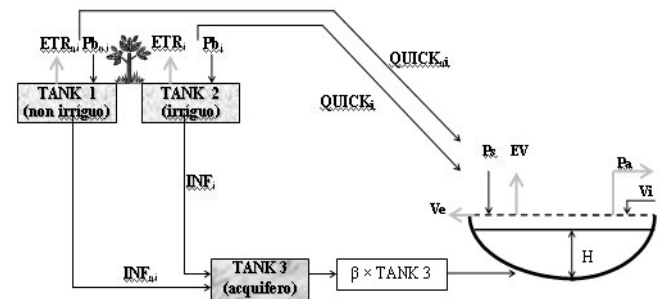


Fig. 2 – Schema concettuale del modello LAGO; per il significato dei simboli vedere il testo  
Conceptual scheme of model LAGO; the meaning of the symbols in the text

La calibrazione del modello viene effettuata, seguendo il criterio dei minimi quadrati, sulla base dell’errore standard generato dalla differenza fra livelli reali e simulati: la gestione della funzione errore viene affidata ad una routine implementata sulla base della teoria dell’*annealing* (Aarts & Korst, 1990). Allo stato attuale LAGO accetta fino ad un massimo di 16 coefficienti da calibrare; è importante sottolineare come i risultati del modello sono sostanzialmente simili calibrando 9 o più coefficienti. Nel caso si disponesse delle grandezze meteorologiche per stimare con buona approssimazione l’evapotraspirazione potenziale e l’evaporazione dallo specchio, il numero dei coefficienti da calibrare scenderebbe, nell’attuale versione di LAGO, a 5.

LAGO è stato applicato con buoni risultati ai laghi Trasimeno e Bolsena, ottenendo errori medi di qualche centimetro sulla simulazione dei livelli, trascurabili se confrontati con la profondità dei laghi e, soprattutto, con la precisione delle misure (Dragoni *et alii*; 2005, Manciola *et*

alii, 2005); ulteriori applicazioni sono in corso per il lago di Bracciano.

Il modello idrologico CEQUEAU, sviluppato da INRS – Eau Quebec (Istitute Nationelle de la Recherche Scientifique-Eau), è un modello parametrico matriciale a bilancio di massa, che tiene conto delle caratteristiche fisiografiche del bacino, delle loro variazioni spaziali e temporali e dell'esistenza di opere idrauliche (Morin *et alii*, 1998). Il bacino idrografico analizzato viene suddiviso in elementi; la lama di acqua prodotta su ciascuno di essi è trasferita dall'uno all'altro per ottenere la portata alla sezione di chiusura del bacino stesso.

CEQUEAU è stato applicato con successo al lago di Bolsena (Manciola *et alii*, 2005), ottenendo risultati simili a quelli forniti da LAGO.

Il modello GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) è stato sviluppato per simulare il carico di sedimenti, pesticidi e nutrienti forniti alle acque dalle attività agricole (Knisel, 1993). In un'ottica di *land planning*, GLEAMS è stato applicato al lago di Vico, verificando che le simulazioni fornite dal modello fossero coerenti con i dati sperimentali. La verifica, oltre a fornire valide informazioni, ha confermato la sostanziale affidabilità della procedura e la possibilità di impiego generalizzato.

Il modello MODFLOW è in fase di applicazione all'intera struttura cimino-vicana per definire, all'equilibrio, i volumi e le modalità di flusso idrico sotterraneo della struttura stessa. I primi risultati confermano quelli ottenuti con mezzi tradizionali, evidenziando però l'anisotropia della conducibilità idraulica coerentemente con la direzione preferenziale delle faglie e delle fratture che interessano l'acquifero. Il MODFLOW, inoltre, è stato impiegato per studiare il problema dei rapporti fra pozzi e corpi idrici superficiali, fornendo alcuni interessanti risultati preliminari, adatti a fiumi o a laghi di piccole dimensioni, a partire dai quali si sta lavorando per estenderne l'applicabilità anche a laghi veri e propri (Di Matteo & Dragoni, 2005).

### 3. Risultati specifici ottenuti

I risultati specifici ottenuti riguardano i quattro sistemi lacustri oggetto dell'indagine.

#### 3.1 Lago Trasimeno

Il Trasimeno è privo di emissari naturali, negli ultimi decenni ha avuto una superficie media di circa 121 km<sup>2</sup> e profondità massima inferiore a sei metri. Il lago, oltre che dalle piogge sullo specchio e dalle acque di ruscellamento, è alimentato dalla falda idrica che lo circonda; le indagini eseguite confermano che si può assumere che in media il bacino imbrifero corrisponda al bacino idrogeologico. I livelli del Trasimeno, a causa del bacino imbrifero piuttosto piccolo rispetto la superficie del lago sono molto variabili.

Qui basterà richiamare che alla fine del 1800 vi era un grave problema di livelli alti, che fu risolto nel 1898, quando fu costruito l'emissario che, ancor oggi, impedisce che il Trasimeno arrivi a quote tali da provocare problemi all'agricoltura ed agli insediamenti rivieraschi. L'emissario, che ha una portata massima teorica di 12 m<sup>3</sup>/s, è abbastanza efficiente nello smaltire le piene, anche se qualche problema si può verificare nel caso di sequenze di anni molto umidi ed eventi piovosi eccezionali (Dragoni, 2004). Il periodo 1950-1958 segnò una gravissima crisi idrica del lago, tanto che all'epoca si temette "l'essiccamento del lago": il minimo livello fu raggiunto nell'ottobre del 1958, con 254.69 m s.l.m., corrispondente ad una profondità massima di poco più di tre metri. Per contrastare il fenomeno, alla fine degli anni 1950, furono condotti al lago 74.40 km<sup>2</sup> appartenenti ad altri bacini idrografici: dopo di ciò, nel giro di pochi anni il lago raggiunse quello che oggi è considerato lo "zero idrometrico", ossia la quota di 257.33 m s.l.m. (maggio 1964). Dal giugno 1989 è iniziato un nuovo periodo di livelli bassi, sincronizzato, come sempre, con un periodo leggermente più caldo della media e, soprattutto, con una bassa piovosità. Dal 1989 ad oggi, l'emissario non è mai entrato in funzione. I livelli minimi sono stati raggiunti nelle estati del 2003 e del 2004, con gravi effetti sull'economia e sull'assetto ambientale dell'intero sistema.

Il modello LAGO è stato dapprima calibrato sul periodo 1985-2004, ottenendo, a causa delle numerose incertezze sui dati in ingresso, un insieme di calibrazioni con risultati, dal punto di vista dell'errore, fra loro simili, ma con coefficienti diversi a seconda delle assunzioni di partenza su prelievi ed evaporazione (fig. 3). Successivamente sono state realizzate una serie di simulazioni al fine di verificare gli effetti sul lago Trasimeno di condizioni climatiche e gestionali differenti dalle attuali. I risultati ottenuti applicando LAGO, pur partendo da ipotesi diverse e con diverse configurazioni del modello, convergono verso una unica soluzione dei problemi di crisi idrica del lago: sotto le attuali condizioni climatiche, il livello attorno alla quota di sfioro dell'emissario può essere mantenuto solo agendo sui prelievi artificiali e/o su apporti idrici esterni al bacino, in modo tale che la somma di tali azioni corrisponda ad un volume medio complessivo di almeno  $1.5 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/anno (fig. 4). Ciò, peraltro, porterebbe ad un miglioramento della qualità delle acque, dato che l'entrata in funzione dell'emissario, produrrebbe un immediato e significativo ricambio delle acque stesse.

Da un punto di vista teorico, modellizzazioni più accurate e formalmente più robuste potrebbero essere ottenute, con LAGO o altri modelli, se si disponesse di misure di evaporazione affidabili.

La figura 4 riporta, a titolo d'esempio, il grafico riassuntivo dei livelli del lago negli ultimi decenni per diversi apporti artificiali da zone esterne al bacino.

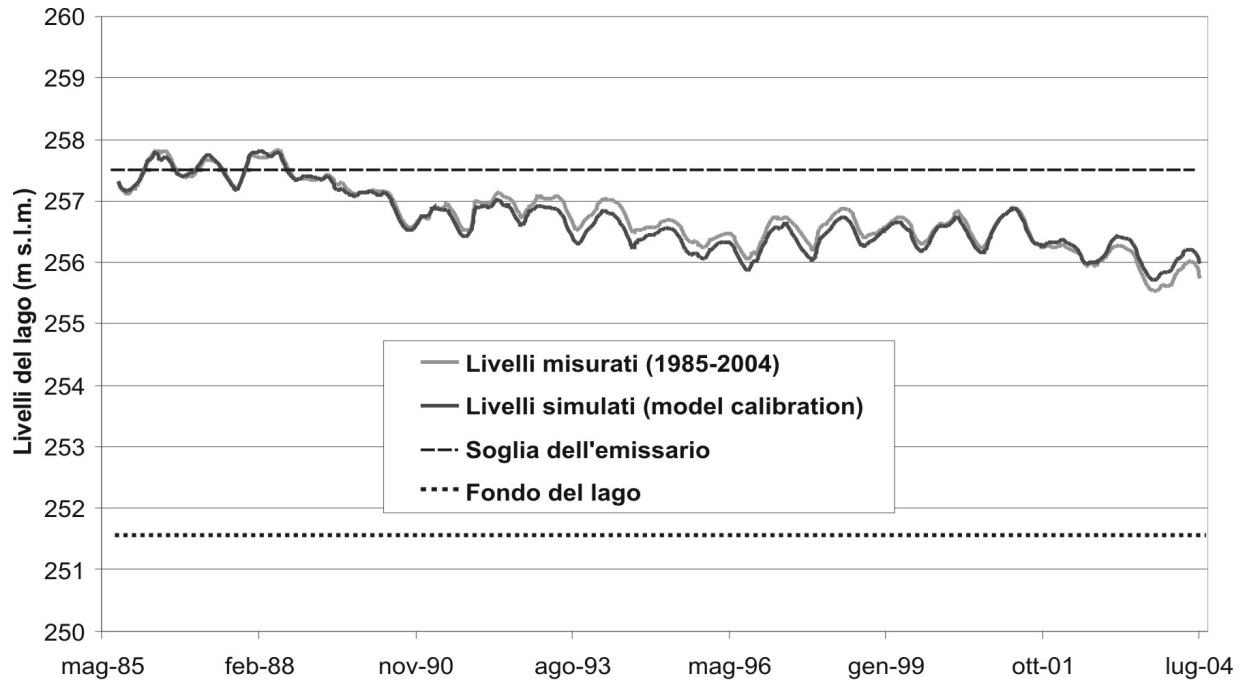


Fig. 3 – Calibrazione dei livelli del Lago Trasimeno (con Modello LAGO)  
*Calibration curve of Trasimeno Lake (model LAGO)*

**Simulazioni dei livelli mensili con immissione di vari volumi d'acqua nel Lago Trasimeno dal 1989**

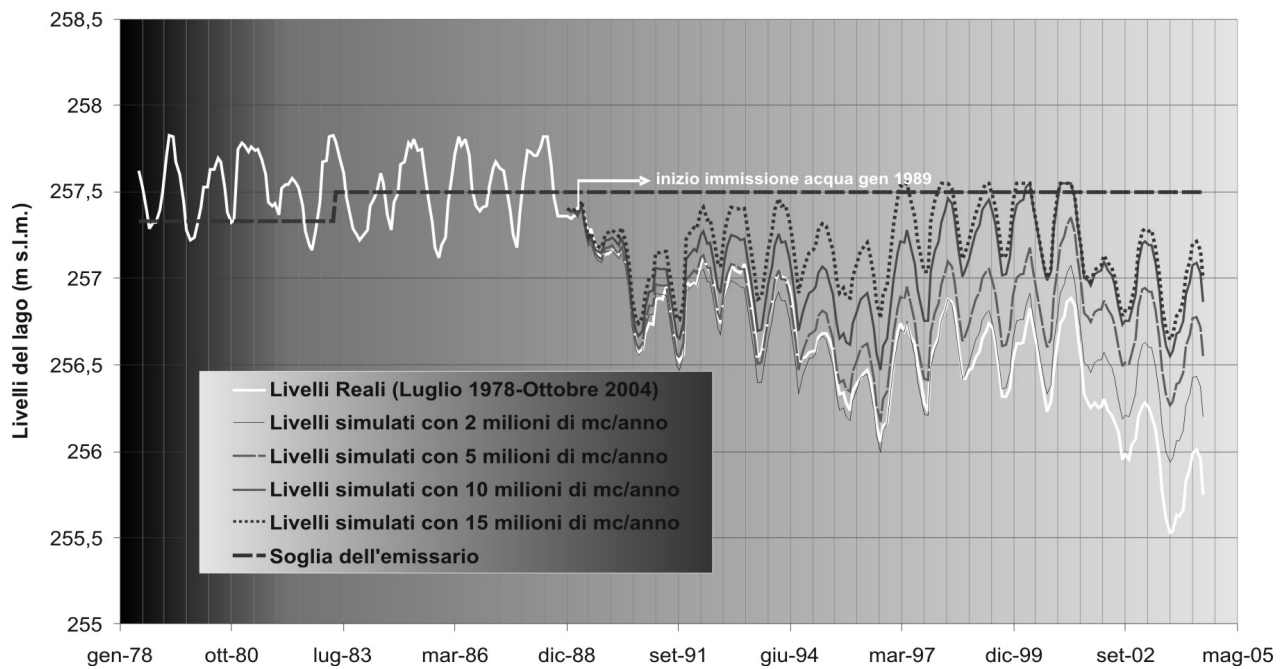


Fig. 4 – Simulazioni dei livelli mensili del Lago Trasimeno con immissione di vari volumi d'acqua., distribuiti uniformemente nel corso dell'anno (1989-2005)  
*Simulation of the monthly levels of Trasimeno Lake with different volumes of supplied artificially, uniformly distributed during the year (1989-2005)*

### 3.2 Lago di Bolsena

Il lago di Bolsena è il più grande lago di origine vulcanica d'Europa, con superficie media di circa 113 km<sup>2</sup> e profondità di 151 m. Il suo bacino imbrifero (273 km<sup>2</sup>) è costituito principalmente da formazioni vulcaniche, messe in posto da più eruzioni, essenzialmente esplosive, verificatesi a partire da 0.6 M.a. fino a 0.15 M.a. Le vulcaniti costituiscono un acquifero freatico alimentante il lago, limitato inferiormente dalle formazioni sedimentarie plio-pleistoceniche del ciclo neoautoctono e da flysch cretastico-oligenico.

Nell'ambito della ricerca è stata posta l'attenzione sulle caratteristiche idrogeologiche del complesso vulsino, proponendo una nuova carta delle isopiezometriche (relativa al periodo maggio-giugno 2005) e fornendo alcune stime dei principali parametri idrogeologici: le indagini eseguite hanno confermato che il bacino idrogeologico è notevolmente più esteso di quello superficiale. L'utilizzo del modello LAGO (fig. 5) ha fornito nuove stime per varie grandezze, fra cui evaporazione dallo specchio (935 mm/anno) ed evapotraspirazione dal bacino imbrifero (620 mm/anno). L'alto coefficiente di deflusso determinato, pari a 0.5, si spiega con l'importanza che ha, per il lago, il deflusso sotterraneo. Vale la pena di sottolineare che LAGO, a dispetto della scarsa precisione dei dati in ingresso, fornisce per Bolsena una evaporazione notevolmente inferiore di quella del Trasimeno (935 mm/anno, contro circa 1050 mm/anno) come ci si deve aspettare in considerazione della profondità ben maggiore del lago di Bolsena. Da un punto di vista operativo e decisionale appare che entrambi i modelli LAGO e CEQUEAU possono essere usati per mettere a punto scenari sotto diverse ipotesi climatiche e di gestione.

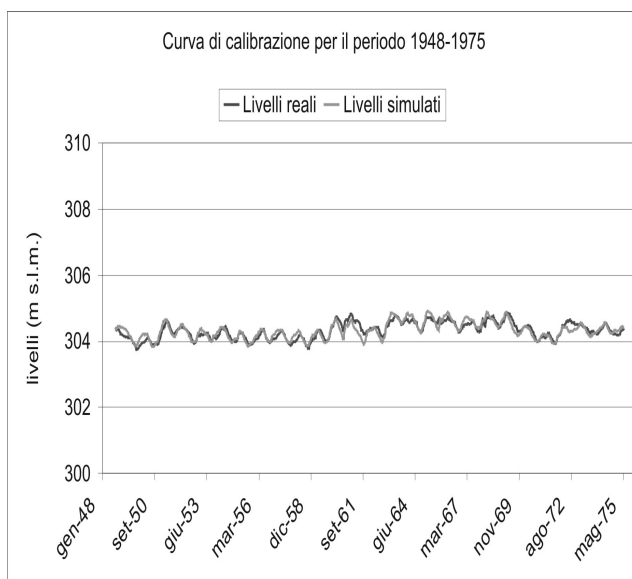


Fig. 5 – Calibrazione dei livelli del Lago di Bolsena (con Modello LAGO)

*Calibration curve of Bolsena Lake (model LAGO)*

### 3.3 Il sistema del lago di Vico

I complessi vulcanici cimino e vicano costituiscono un sistema avente una propria individualità idrogeologica, riconducibile a motivi stratigrafici, vulcano-tettonici e morfologici. Il sistema indagato ha una estensione di circa 900 km<sup>2</sup> ed è costituito da rocce vulcaniche e vulcanoclastiche, permeabili per porosità e fessurazione, che danno luogo ad un esteso acquifero di base, spesso da alcuni metri ad alcune decine di metri, e più falde sospese di limitata continuità e spessore.

La falda di base ha un deflusso radiale centrifugo con recapiti principali verso i torrenti, soprattutto a sud-est, ad ovest e a nord, e travasi verso gli acquiferi adiacenti, soprattutto nel settore orientale verso i depositi alluvionali del fiume Tevere. Tale schema nelle linee generali è in accordo con Capelli *et alii* (2005), ma se ne differenzia per il ruolo idrogeologico del margine nord-orientale dell'acquifero vulcanico, avendo rilevato nel corso del presente studio una ridotta possibilità di flussi idrici sotterranei verso la valle del Tevere. Inoltre, solo in parziale accordo con Capelli *et alii* (2005), le acque sotterranee del versante orientale del sistema idrogeologico sembrano avere recapito principalmente nel basso corso del torrente Biedano, nel torrente Rigomero ed in parte nel torrente Leia, il cui deflusso di base è alimentato anche dal flusso idrico sotterraneo che riguarda le propaggini sud-orientali del complesso vulcanico vulsino.

Le indagini eseguite indicano trasmissività comprese fra da 10<sup>-6</sup> e 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s, testimonianza della notevole eterogeneità del mezzo, legata al complicato assetto giaciturale dei diversi prodotti. Le elaborazioni eseguite mostrano i valori più elevati di trasmissività nel settore sud-orientale dell'acquifero, laddove sono stati individuati consistenti travasi idrici sotterranei verso la valle del Tevere.

Le indagini effettuate hanno permesso anche una prima stima del flusso idrico sotterraneo medio, per gli ultimi decenni, del sistema idrogeologico. È risultata una portata compresa tra 5 e 7 m<sup>3</sup>/s, equivalente ad un rendimento medio in acque sotterranee dell'acquifero compreso tra 6 e 8 l/s per km<sup>2</sup>. Questa stima da considerare significativa in termini di ordine di grandezza, soffre, così come le altre valutazioni relative allo stesso ambiente idrogeologico, delle carenze di dati di base continui nel tempo.

Il lago di Vico (circa 12 km<sup>2</sup> di estensione e profondità massima di circa 50 m) nell'ambito del sistema idrogeologico indagato rappresenta l'affioramento alto della falda di base dell'acquifero vulcanico. Ad esso non è stato possibile applicare alcuna modellizzazione per la mancanza di sequenze di dati continue sulle portate dell'emissario. La piezometria mostra che il lago è alimentato a nord dalla porzione di acquifero corrispondente all'alto morfologico dei Monti Cimini (tale apporto appare essere attorno a 2×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno); ad ovest, a sud e, specialmente, ad est del lago di Vico, la falda è alimentata dal lago (dalle valutazioni effettuate tale flusso dovrebbe essere almeno di 7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno). Questi ultimi flussi, per la modesta superficie del lago, hanno una non trascurabile influenza sul bilancio medio annuo dello stesso (corrispondono ad almeno il 26%

delle perdite totali dal lago). Il livello del lago, sempre a causa della piccola superficie, risente in maniera assolutamente rilevante delle modalità di regolazione dell'efflusso dall'emissario, non sempre riconducibile a quella di un razionale uso congiunto delle risorse idriche superficiali e sotterranee come richiederebbero i problemi ambientali del lago stesso.

L'indagine condotta non ha evidenziato alterazioni degli equilibri idrogeologici alla scala dell'intero sistema, anche se è necessaria una razionalizzazione degli attuali schemi dei prelievi idrici. Tale razionalizzazione non può che scaturire da un approfondito monitoraggio delle variabili idrogeologiche segnalate in precedenza.

### 3.4 Lago di Bracciano

Il lago di Bracciano ha un'estensione di oltre 57 km<sup>2</sup> ed una profondità massima di 160 m. Il bacino idrografico, esteso per circa 91 km<sup>2</sup> ed impostato sulle vulcaniti sabatine, è solcato da corsi d'acqua non perenni, alimentati esclusivamente dalle acque di ruscellamento connesse agli eventi meteorici. L'emissario naturale del lago, il fiume Arrone, presentava in passato una portata media superiore al metro cubo al secondo, ma a seguito della derivazione realizzata negli anni '60 dall'ACEA (Acquedotto Paolo), il deflusso si è gradualmente ridotto fino ad annullarsi nell'ultimo decennio. Come nel caso del lago di Bolsena, il bacino idrogeologico medio, delimitato sostanzialmente da un contorno idrodinamico dipendente dalla ricarica e dai prelievi tramite pozzi, è più esteso del bacino superficiale, con un valore medio che sembra essere attorno ai 110 km<sup>2</sup>, incluso l'intero bacino idrografico. Il sembra è d'obbligo data la scarsa presenza di pozzi e piezometri e la difficoltà di ricostruire una piezometria attendibile, soprattutto nelle zone orientali. Comunque appare che la piezometria ricostruita per il 2005 non abbia subito, rispetto i rilevamenti precedenti, abbassamenti rilevanti (Camponeschi & Lombardi, 1969; Boni *et alii*, 1986; Ventriglia, 1989; Acquaital, 1997; Capelli *et alii*, 2005). Il bacino sotterraneo d'alimentazione è costituito dalle sequenze vulcaniche, permeabili per porosità e per fessurazione; l'acquifero presenta livelli a bassa permeabilità che localmente possono determinare l'esistenza di falde sospese di limitata estensione e potenzialità. L'idrodinamica è notevolmente influenzata dalla morfologia e dagli affioramenti del substrato prevulcanico, a permeabilità molto bassa e con morfologia molto articolata.

L'analisi del bilancio per il bacino idrogeologico e per lo specchio lacustre è stata condotta per il periodo 1975-2004. Il livello idrometrico del lago, diretta espressione della disponibilità idrica in assenza di un emissario attivo, presenta su base annuale oscillazioni contenute (un metro al massimo, corrispondente a circa 40×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> di variazione di volume, attorno all'1% del volume lacustre). A scala pluriennale si osserva un debole trend negativo, dove spiccano due periodi di crisi idrica, registrati alla fine degli

anni '80 e nel 2003. Tale tendenza è da imputarsi, più che al debole trend negativo della piovosità, ai prelievi artificiali dalla falda ad uso potabile, irriguo e civile nella zona di ricarica (attualmente stimati in 10×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno, di cui un terzo ad uso potabile) e dai prelievi diretti dal lago da parte dell'ACEA, che si attestano in media sui 25×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno. Il nuovo collettore circumlacuale di raccolta di acque reflue costituisce un'ulteriore limitazione di afflusso diretto al lago, con portate medie smaltite al depuratore di circa 4×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno, che in precedenza venivano direttamente immessi nel lago ed oggi vengono riversati nel fiume Arrone, a valle dello specchio lacustre.

Il calcolo del bilancio del bacino idrogeologico del lago di Bracciano evidenzia una ricarica della falda di circa 25×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno, di cui circa 15×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno defluiscono nel lago. Tutte le stime qui riportate vanno considerate di larga massima, dato che mancano serie di dati lunghe ed affidabili su cui eseguire una modellizzazione matematica con risultati più precisi.

In definitiva si può affermare che a parte il prosciugamento dell'emissario, il lago di Bracciano non presenta attualmente squilibri consistenti determinati dai prelievi antropici, tali da rendere necessaria l'adozione di provvedimenti restrittivi dell'uso della risorsa idrica sotterranea, di cui è invece stato recentemente oggetto il bacino del lago sulla base della nuova normativa regionale.

Visto che le oscillazioni idrometriche sono influenzate, oltre che da fattori naturali, dal prelievo ACEA, quest'ultimo rappresenta il termine dell'equazione di bilancio su cui poter intervenire in modo diretto. Di conseguenza, nel quadro di utilizzazione attuale, è possibile garantire, in condizioni climatiche medie, un bilancio idrologico del lago in pareggio, operando una modulazione dei prelievi a scopo potabile. Tale regolazione dei prelievi, già autonomamente adottata dall'ACEA in risposta a periodi particolarmente siccitosi, se concordata con gli enti territoriali, consentirebbe di garantire condizioni idrometriche ottimali sia a fini di conservazione ambientale che turistici.

## 4. Risultati di carattere generale

I risultati di carattere generale sui sistemi lacustri investigati riguardano essenzialmente le problematiche connesse con la vulnerabilità all'inquinamento dei corpi idrici superficiali e degli acquiferi ad essi correlati.

In tal senso risulta che i laghi di origine vulcanica dell'alto Lazio sono particolarmente sensibili all'eutrofizzazione, per il debole ricambio delle acque e, quindi, per i lunghi tempi di rinnovo. Nell'ambito della ricerca qui riassunta sono stati considerati, dal punto di vista dell'eutrofizzazione il lago di Vico e quello di Bracciano, per i quali è il fosforo il principale fattore limitante dei fenomeni eutrofici (Barbanti *et alii*, 1971) e la cui origine è duplice: fonti puntiformi e fonti diffuse. Le prime sono riconducibili a collettori che scaricano direttamente nel

corpo idrico o in suoi affluenti; le seconde sono invece prodotte spazialmente, soprattutto con le attività agricole che utilizzano fosforo ed azoto come fertilizzanti. L'unico mezzo realmente efficace per il controllo delle fonti diffuse è la gestione razionale del territorio (Dillon & Kirchner, 1975). Per entrambi i laghi esaminati è stato ricostruito l'uso e la copertura del suolo, evidenziando i fattori di maggiore rischio dal punto di vista della qualità delle acque. Il tutto è stato rapportato ai monitoraggi istituzionalmente effettuati dall'ARPA Lazio, che hanno evidenziato le problematiche maggiori per il lago di Vico, il cui arricchimento in fosforo risulta del tutto anomalo. La causa di questo fenomeno è da attribuirsi al trasporto di fosforo particolato da parte del suolo eroso nei territori agricoli (Garnier *et alii*, 2004).

La modellizzazione tramite GLEAMS ha fornito i seguenti prodotti: la carta del rischio di erosione del suolo e di asportazione di fosforo; la valutazione dell'efficienza ambientale di scenari di mitigazione degli impatti (pratiche agricole conservative del suolo); l'individuazione delle aree-problema su cui focalizzare ulteriori sforzi economici, di supporto alla sostenibilità dell'agricoltura.

La tematica della vulnerabilità all'inquinamento delle acque sotterranee delle aree perilacuali è stata inizialmente affrontata mediante i metodi parametrici in uso in Italia. Il metodo SINTACS è stato applicato in via preliminare al settore settentrionale della struttura cimino-vicana; i risultati ottenuti comunque non sono stati pienamente soddisfacenti in relazione soprattutto al fatto che detti metodi sono di ausilio solo per caratterizzazioni a larga scala e di primo approccio al problema. Tuttavia l'esperienza ha evidenziato, tra l'altro, la notevole influenza dei parametri suolo e non saturo sulla determinazione generale dell'indice di vulnerabilità complessiva. Pertanto l'attenzione è stata successivamente rivolta alla caratterizzazione della acquifero non saturo, primo filtro della eventuale contaminazione proveniente dalla superficie.

In tal senso lo studio è stato condotto mediante indagini in sito ed esperimenti in laboratorio. Le indagini in sito sono state condotte attrezzando due stazioni di misura, nel bacino del lago di Vico, dell'andamento della tensione e del contenuto idrico del suolo nel corso dell'anno; i due siti sono stati scelti in modo da essere significativi della diversa profondità della falda e del diverso uso del suolo. In laboratorio sono state condotte prove di tracciamento mediante tracciante non reattivo. A questo scopo sono stati appositamente progettati e costruiti due permeametro-colonne, per riprodurre correttamente i profili pedologici di interesse e nello stesso tempo per tener conto della dipendenza della dispersività dalla scala di esperimento.

Gli esperimenti, condotti su profili tipo dei suoli vicani, hanno permesso la determinazione dei parametri idrogeologici e idrodispersivi, quali la porosità efficace, la conducibilità idraulica, il numero di Peclet, la dispersività e la velocità effettiva. I primi risultati indicano conducibilità idrauliche comprese tra  $10^{-5}$  e  $10^{-7}$  m/s e dispersività

dell'ordine di alcuni centimetri. Attraverso questi dati è stato possibile schematizzare, mediante le relazioni per un flusso monodimensionale, la tendenza della concentrazione di un contaminante non reattivo nel tempo in un mezzo saturo (i primi metri di sottosuolo), risultando una notevole dispersione del mezzo.

## 5. Conclusioni

I sistemi di Bolsena, Vico e Bracciano non appaiono, dal punto di vista idrogeologico quantitativo, troppo pesantemente compromessi, ma chiaramente la diminuzione (o l'annullamento) delle portate dei relativi emissari non può essere trascurata e andrebbe ridiscussa. Il lago Trasimeno e i laghi Albani sono in una situazione particolarmente critica; come già rilevato da altri autori (Capelli *et alii*, 2005), tutto indica che per i laghi Albano e di Nemi la causa dell'eccezionale abbassamento dei livelli vada ricercata soprattutto nel sovrasfruttamento della falda.

I laghi dell'Italia Centrale costituiscono un patrimonio culturale unico: la ricerca ha in qualche modo contribuito alla valorizzazione di tali aspetti, soprattutto per i laghi Albani ed il Trasimeno (Castellani & Dragoni, 2004; Burzigotti *et alii*, 2003), ma sono state avviate indagini anche sull'antico sistema di regolazione del lago di Vico e si è raccolto del materiale per la storia dei laghi minori e dei numerosi "laghi scomparsi", cioè bonificati nel corso degli ultimi tre millenni.

Per ciò che riguarda il clima, le indagini eseguite hanno confermato, su tutta l'area riportata in figura 1, un trend negativo della piovosità e di un lieve aumento della temperatura: va detto, però che tali tendenze non sono uniformi e non sono segnalate da tutte le stazioni. In ogni caso vi sono forti segnali che in futuro vi sarà una diminuzione delle risorse idriche complessive, accompagnata ad un incremento degli eventi estremi, sia in termini di siccità che di intensità delle piogge. Tali scenari, peraltro condivisi dalla comunità scientifica internazionale (indipendentemente dalle opinioni sulle cause delle variazioni climatiche in atto), andrebbero presi in seria considerazione per cercare di limitare gli impatti negativi prevedibili, anche considerando i laghi artificiali presenti nell'area (sono state eseguite indagini, in corso di pubblicazione o completamento, sui laghi delle dighe di Fiorenzuola, Umbria, e di Montedoglio, Toscana).

La ricerca ha messo purtroppo in evidenza che, a dispetto dell'importanza dei sistemi lacustri della zona e degli interessi economici, ambientali e culturali che su di essi gravitano, la rete di rilevamento dei dati è assolutamente carente: mancano misure continue di portata, piovosità, temperatura, evaporazione e dei livelli piezometrici, le stazioni in quota sono estremamente rare ed i prelievi sono noti con una precisione assolutamente grossolana, con errori, contraddizioni ed omissioni palesi. È chiaro che in queste condizioni modelli di simulazione e bilanci, non importa quanto teoricamente validi, possono

fornire al più delle stime approssimative, mentre invece i tempi richiedono interventi e piani precisi e coerenti con le attuali conoscenze. I risultati scaturiti dalla ricerca ora descritta possono contribuire notevolmente alla gestione del territorio, ma questa sarà comunque carente se non accompagnata da una seria rete di rilevamento dati.

Infine, non è forse inutile rilevare che i progetti PRIN, la cui esistenza è essenziale per la ricerca scientifica e nel cui ambito sono state svolte le indagini e raggiunti i risultati qui riassunti, dovrebbero durare non due anni, ma almeno tre o quattro: le ricerche di ampio respiro sul territorio hanno bisogno di tempi lunghi e non possono essere gestite come alcuni progetti di ricerca "industriali", che a volte assemblano spesso componenti e tecniche note, e per i quali può essere prescritta (e prevista a priori) una certa tempistica. Nel caso specifico sono in corso di preparazione

varie pubblicazioni che potranno essere stampate nell'arco di un paio d'anni. In ogni caso si è provveduto a divulgare i risultati agli enti interessati con vari incontri e la pubblicazione di un sito web.

## Ringraziamenti

Lavoro eseguito nell'ambito del progetto "Impatto dell'attività antropica e delle variazioni climatiche sul bilancio idrogeologico dei più importanti laghi dell'Italia centrale: modellizzazione dei processi in corso e possibili strategie di gestione" finanziato MIUR, Università di Perugia e Università della Tuscia, coordinato da W. Dragonì. L'articolo è stato condotto congiuntamente dalle Unità di Ricerca dell'Università di Perugia (resp. W. Dragonì) e dell'Unità della Tuscia (resp. V. Piscopo).

## Bibliografia

- Aarts, E., Korst, J., 1990. Simulated annealing and Boltzmann Machines. John Wiley & Sons.
- Alley, W. M., 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Wat. Resour. Res.* 20 (8), 1137-1149.
- Aquaital s.r.l., 1997. Studi preliminari per il Piano di Bacino. ST8 Modello di gestione del Lago di Bracciano, Regione Lazio, Ass.to Opere e Reti di Servizi e Mobilità. Relazione inedita.
- Barbanti, L., Bonomi, G., Carollo, A., Chiaudani, G., Ferrari, I., Gerletti, M., Nocentini, A. M., Ruggiu, D., Tonolli L., 1971. Limnologia ed ecologia dei laghi di Bolsena, Bracciano, Trasimeno e Vico: situazione attuale e prevedibili conseguenze derivanti da una loro utilizzazione multipla. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, Pallanza (NO).
- Boni, C., Bono, P., Capelli, G., 1986. Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale. *Mem. Soc. Geol. It.* 35, 991-1012.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., Nanni, T., 2000. Variazioni climatiche in Italia negli ultimi 130 anni. *Bollettino Geofisico* XXXIII (3-4).
- Burzigotti, R., Dragonì, W., Evangelisti, C., Gervasi, L., 2003. The Role of Lake Trasimeno (Central Italy) in the History of Hydrology and Water Management. Third IWHA Conference, Bibliotheca Alexandrina, 11-14 December 2003, Alexandria, Egypt.
- Cambi, C., Dragonì, W., Valigi, D., 2000. Hydrological cycle and climate changes: a review with emphasis on the West-Mediterranean Area. In "Water resources management in a vulnerable environment for sustainable development" edited by K. Andah UNESCO, GNDCI - CNR, Perugia, 87-95.
- Cambi, C., Dragonì, W., Valigi, D., 2003. Water management in low permeability catchments and in times of climatic change: the case of the Nestore River (western central Italy). *Physics and Chemistry of the Earth* 28 (4-5).
- Camponeschi, B., Lombardi, L., 1969. Idrogeologia dell'area vulcanica Sabatina. *Mem. Soc. Geol. Ital.* 8, 25-55.
- Capelli, G., Mazza, R., Gazzetti, C. 2005. Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio. Gli acquiferi vulcanici. *Quaderni di tecniche di protezione ambientale*, 78, Pitagora Bologna, 216 pp.
- Castellani, V., Dragonì, W., 2004. Gli Emissari dei Laghi Albani. Aggiornamenti e prospettive. In "Lazio & Sabina" a cura di Giuseppina Ghini, Lavori e Studi della Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio, De Luca Editori d'Arte, 215-220.
- Dillon, P. J., Kirchner, W. B., 1975. The effects of geology and land use on the export of phosphorus from watersheds, *Water Resources* 9, 135-148.
- Di Matteo, L., Dragonì, W., 2005. Empirical relationships for estimating stream depletion by a well pumping near a gaining stream. *Ground Water* 2 (43), 242-249.
- Dragonì, W., 1998. Some considerations on climatic changes, water resources and water needs in the Italian region south of the 43°N. In "Water, Environment and Society in Times of Climatic Change". Issar A., Brown N. editors. Kluwer.
- Dragonì, W., 2004. Il Lago Trasimeno e le Variazioni Climatiche. Progetto informativo dell'assessorato all'Ambiente della Provincia di Perugia, Servizio Gestione e Difesa Idraulica, 60 pp.
- Dragonì, W., Gnucci, L., Melillo, M., 2005. LAGO, a mathematical model for simulating lake levels. Presentato a Geotalia 2005, Spoleto 21 - 23 settembre 2005.
- Garnier, M., Leone, A., Lo Porto, A., Ripa, M. N., 2004. Agricultural Land Use And Best Management Practices To Control Nonpoint Water Pollution: the Lake Vico Case. (Sottoposto a *Jour. Environmental Management*).
- Knisel, W. G., 1993. GLEAMS - Groundwater Leaching Effects of Agricultural Management Systems. Version 3.10. University of Georgia. Coastal Plain Experimental Station, Tifton, Georgia, 260 pp.
- Manciola, P., Gnucci, L., Di Francesco, S., 2005. Modellistica concettuale applicata al bilancio idrogeologico del lago di Bolsena. *Atti del Convegno "Lagune, Laghi e Invasi Artificiali Italiani"*, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 22 marzo 2005 (in stampa).
- Morin, G., Paquet, P., Sochansky, W., 1998. Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU: Manuel de references. Organisations des Nations Unies et INRS-Eau.
- Van Dam, J. C., 1999. Impacts of climate change and climate variability on hydrological regimes. *International Hydrology Series*, Cambridge University Press, 156 pp.
- Vandewiele, G. L., Xu, C. Y., Win, N. L., 1992. Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma. *Journ. Hydrol.* 134, 315-347.
- Ventriglia, U., 1989. Idrogeologia della Provincia di Roma: Regione Vulcanica Sabatina. Amministrazione Provinciale di Roma, Assessorato ai L.L.P.P. Viabilità e Trasporti, 480 pp.